МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-50 10.23947/1992-5980-2017-17-2-70-78

Нечеткая система управления состоянием многооперационного станка*

А. К. Тугенгольд[1], А. И. Изюмов[2], Р. Н. Волошин[3], М. Ю. Соломыкин[4]**
[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Fuzzy control system of multioperational machine status ***

A. K. Tugengold[1], A. I. Izyumov[2], R. N. Voloshin[3], M. Y. Solomykin[4]**
[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье представлены основные аспекты построения системы управления состоянием многооперационных станков с программным управлением на базе информационно-управляющего модуля *e-Mind Machine* и аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Показано, что входные воздействия системы управления формируются за счет множеств наследуемых и оперативных составляющих параметров состояний. Целью работы является построение системы контроля состояния, выявление размерного износа и определение периода стойкости инструмента на основе методов нечеткой логики.
Материалы и методы. Предложен новый алгоритм построения экспертной системы на основе методов нечеткой логики. Показана применимость нейронечетких методов для решения задач определения срока службы инструмента путем сравнения расчетных значений с данными фирм-производителей. Исследование основывается на применении концепции электронного обслуживания с использованием экспертных систем.
Результаты исследования. Обоснованы основные принципы построения и использования системы мониторинга, обеспечивающей возможность при управлении адаптироваться к складывающейся ситуации и прогнозировать изменения состояний в процессе обработки деталей. В функции мониторинга включена не только обработка данных, полученных от диагностических устройств мехатронной системы и внешнего оборудования, но и прогнозирование остаточной размерной стойкости инструмента, прогнозирование стойкости по периоду нормального износа. Процесс принятия решений по управлению состоянием инструмента представлен в виде алгоритма работы экспертной системы на основе использования нейронечеткого контроллера.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть применены в производстве деталей, где точность является важным параметром. Использование автоматизированных систем контроля состояния станка сокращает затраты из-за простоя оборудования, а контроль за состоянием инструмента позволяет снизить процент брака. Показаны характерные примеры принятия решений в нейронечеткой системе.

Introduction. The paper presents the key aspects of constructing a management system for the state of multi-operation computer-controlled machines based on the information-control module of *e-Mind Machine* and the apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic. It is shown that the input effects of the control system are formed due to the sets of inheriting and operating components of the status parameters. The work objective is to develop a system for monitoring the condition, detecting dimensional wear, and determining the period of tool life on the basis of the fuzzy logic methods.
Materials and Methods. A new algorithm for constructing an expert system based on the fuzzy logic methods is proposed. The applicability of fuzzy neuron methods for solving the problems on determining the service life of the instrument through comparing the calculated values to the data of the manufacturing firms is demonstrated. The study is based on the application of the concept of electronic services using expert systems.
Research Results. The basic principles of the construction and application of the status monitoring system are substantiated. They provide the possibility, under managing, to adapt to the emerging situation and to predict state changes when processing the parts. The monitoring functions include not only the processing of data obtained from the test units of the mechatronic system and external equipment, but both the forecasting of the residual dimensional tool life and the durability for the period of normal wear and tear. The decision-making process on managing the tool status is presented in the form of an algorithm for the expert system activity based on the use of a fuzzy neuron controller.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be applied in the parts production where accuracy is one of the key parameters. Automated control systems for the machine condition allow reducing costs due to equipment downtime, and monitoring the tool status can reduce the rejection rate. The characteristic examples of decision-making in the fuzzy neuron system are given.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail:akt0@yandex.ru, andrey-igorevich1991@yandex.ru, r.voloshin2909@gmail.com, oblivion_rk@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: нечеткое управление, нейронечеткий контроллер, мониторинг, экспертная система управления состоянием станка.

Keywords: fuzzy control, fuzzy neuron controller, monitoring, expert control system of machine status.

Введение. В современном компьютеризированном машиностроительном производстве широко используются многооперационные станки (МС), длительное время работающие без участия оператора. При автоматическом функционировании технологических машин вопросы эффективного поддержания их высокой надежности приобретают особую важность. Теряет актуальность стратегия реагирования на технологические нарушения, низкую точность обработки, поломки инструментов, агрегатов и узлов МС в целом. Новым задачам производства в большей степени отвечают программы автоматизированного мониторинга и управления.

Под мониторингом технического состояния подразумевается процесс, обеспечивающий возможность определения текущей эксплуатационной готовности объекта исследования и автоматического принятия оперативных и тактических решений [1–8].

Так, в функции системы мониторинга инструмента входят сбор, хранение и анализ явных или косвенных параметров инструмента на станке. Данная информация позволяет судить о состоянии инструмента и изменениях, происходящих в процессе обработки. Полученные оценки состояния служат основой для принятия решений по управлению функциями дальнейшего использования инструмента или его замены.

Очевидно, что промышленное применение систем управления состоянием предполагает их эффективную работу в различных условиях. Обоснование и создание таких систем остается одной из главных проблем современного машиностроения [9]. Подход, предложенный в работах [9, 10], базируется на следующем представлении: для информационной и интеллектуальной поддержки управления процессами при обработке деталей МС наделяются системой знаний (СЗ) о своих особенностях, процессах обработки, состоянии инструментального обеспечения и пр. Таким образом, для каждой единицы технологического оборудования предусматривается создание информационно-управляющего модуля «умной машины» — *e-Mind Machine* в составе УЧПУ станка или в числе поддерживающих сервисов. Реализация такого подхода стала важным этапом на пути формирования единой среды эксплуатации, программирования и технического обслуживания станков (в том числе многооперационных) и другого технологического оборудования.

В частности, система управления состоянием инструментов МС должна учитывать следующие факторы:
— изнашиваемость инструмента,
— размерный износ,
— остаточная стойкость,
— вибрации и пр.

Мониторинг состояния режущего инструмента является важной и сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, процессы обработки имеют нелинейный характер, а параметры системы могут непрерывно изменяться во времени, что существенно затрудняет оценку состояний. Во-вторых, полученные от датчиков сигналы зависят от множества факторов, таких как условия обработки, геометрия режущих инструментов, материал заготовки и т. д. Применение прямых методов контроля состояния инструмента не представляется возможным, следовательно, необходимы косвенные измерения для оценки износа. Кроме того, сигналы, поступающие от датчиков станка, могут искажаться по многими другим причинам, таким как нагрев инструмента, вибрации, геометрические отклонения инструмента, индивидуальные свойства материала заготовки, зашумленность сигнала аналогово-цифрового преобразования и пр. Этим обусловлена нечеткость знаний о стойкости и состоянии инструментов, находящихся на станке в процессе обработки детали.

Задача управления состоянием. При реализации задач формализации оценки и управления состоянием элементов и устройств в процессе функционирования МС использование традиционного математического аппарата ограничено. Во многих случаях приходится оперировать качественными характеристиками процессов. Невозможно получить точную, достоверную информацию о процессах, поэтому целесообразно использовать аппарат неточных знаний, которые не могут быть интерпретированы как полностью истинные или ложные. Для решения задач, связанных с размытостью и неточностью Л. Заде [11, 12] предложил формальный аппарат нечетких множеств и нечеткой логики. Соответствующие представления нечетких множеств использованы при решении задач оценки и управления состоянием МС:

$$Y = R\,(X),$$

где $\boldsymbol{X} = \{X_1, X_2,\ldots, X_N\}$ — множество входных состояний переменных процесса; $\boldsymbol{Y} = \{\boldsymbol{Y_1}, \boldsymbol{Y_2}, \ldots, \boldsymbol{Y_M}\}$ — множество значений параметров управления; R — нечеткий оператор преобразований в системе управления состоянием.

Основные аспекты представляемой методики управления состоянием МС покажем на примере инструментального обеспечения. Решим задачу управления состоянием i-го инструмента, используемого на некотором *р-м* про-

ходе в операции обработки детали. Множество входных переменных X_i, отображающих в системе знаний состояние i-го инструмента, можно представить в виде:

$$X_i = \{X_{iн}, X_{iо}\},$$

где $X_{iн}$ — множество наследуемых параметров i-го инструмента, соответствующих его состоянию к моменту начала выполнения перехода p при обработке; X_{io} — множество оперативных параметров i-го инструмента, соответствующих его состоянию онлайн в процессе выполнения перехода p.

Во множество $X_{iн}$ включены перечисленные ниже значения.

1. Время T_i, путь резания L_i, обработанная площадь поверхностей A_i, объем Q_i снимаемого материала с заготовки i-м инструментом по переходам операции в процессе обработки детали до рассматриваемого перехода p.

2. Допустимые значения размерного износа инструмента при выполнении перехода p обработки детали, ограниченной допуском по размерной точности поверхности.

3. Действительная скорость (интенсивность) изнашивания инструмента и величина размерного износа.

4. Оценки нечеткой границы размерного износа FBS_i, нечеткой границы износа FB_i по времени [9].

5. Нечеткие представления о состоянии инструмента по соотношению параметров п. 1 с периодом стойкости i-го инструмента и FB_i — нечеткой границы стойкости, т. е. достаточность ресурса инструмента для выполнения следующего технологического перехода. Так, например, время остаточной стойкости инструмента T_{ji} к моменту начала резания на p-м переходе использования i-го инструмента определяется зависимостью

$$T_{ji} = T_{FBi} - \sum_{j=1}^{n-1} t_{ji},$$

где T_{FBi} — период времени до наступления нечеткой границы стойкости; t_{ji} — время резания инструментом при выполненных j предшествующих технологических переходах.

Во множество X_{io} входят данные, получаемые от системы диагностирования непосредственно при обработке оценки стойкости инструмента, состояния и изменениях в процессе обработки.

Система мониторинга состояния. В функции системы мониторинга инструмента входят выявление, сбор, хранение, оценка, анализ и прогнозирование явных или косвенных параметров описания инструмента, находящегося на станке. Полученные таким образом данные позволяют сделать выводы о стойкости инструмента, интенсивности его изнашивания, о состоянии и изменениях в процессе обработки. Для получения входной информации в процессе работы станка применяются различные диагностические устройства — датчики: силы резания; крутящего момента; тока двигателя; эффективной мощности; вибраций; акустической эмиссии; мощности звукового давления; перемещений пр. Сигналы, получаемые от датчиков, лишь косвенно характеризуют состояние инструмента. Поэтому система мониторинга использует методы обработки результатов наблюдений для вывода заключений о состоянии инструмента, в том числе преобразования получаемой от датчиков информации, ее фильтрации. Эти данные используются и для обучения системы [13, 14]. Это особенно важно при использовании инструмента в пределах пограничных полос *WFB* (*width of the fuzzy boundary*) и стойкости *WFBP* (*width of the fuzzy boundary of perseverance*).

В число функций, выполняемых узлом мониторинга, входят следующие.

1. Принимаются решения об использовании для диагностирования i-го инструмента устройств МС и внешних устройств.
2. Для выполнения функций подаются команды на модуль управления диагностическими устройствами.
3. Обрабатываются данные, полученные от диагностических устройств МС и внешнего оборудования.
4. Выполняется мониторинг состояния инструмента.
5. Прогнозируется остаточная размерная стойкость до *FBS* (*fuzzy boundary of the tool wear size*).
6. Прогнозируется остаточная стойкость по периоду нормального износа до *FB* (*fuzzy boundary of the tool life*).

Для выполнения перечисленных задач предусмотрено управление диагностическими устройствами, основной функционал которого представлен ниже.

1. Выбор стратегии и тактики диагностирования при использовании возможностей прямых и (или) косвенных измерений устройствами станка и (или) внешним диагностическим оборудованием.
2. Принятие решений по управлению измерительными устройствами станка, регулирование контролирующих алгоритмов, формирование команд управления.
3. Выработка решений по управлению внешним диагностическим оборудованием, формирование команд управления.
4. Информационная связь с узлами блока ИНСТРУМЕНТ, связь с УЧПУ.

Полученные системой мониторинга оценки состояния и периода стойкости служат основой для принятия экспертной системой (ЭС) решений по управлению функциями его использования или замены.

На стадии, близкой к риску дальнейшей работы инструмента, узел адаптации и специальных режимов резания в ЭС выполняет изменение режимов резания при состояниях, определяемых границами стойкости *FB* или *FBS*. Основные функции блока перечислены ниже.

1. Оценка периода использования *i*-го инструмента относительно «границы стойкости». Функция реализуется при выполнении прохода обработки детали.

2. Принятие решения по адаптации режимов резания (скорости V и (или) подачи S). Функция реализуется при работе *i*-го инструмента для бесперебойного выполнения прохода на детали, находящейся в процессе обработки на станке (т. е. без остановки процесса обработки, связанной с заменой инструмента).

3. Корректировка программы ЧПУ станка.

Для изменения, например, скорости резания $V(T)$ в зависимости от желаемого периода стойкости T можно воспользоваться материалами производителей режущего инструмента, например компании *Sandvik Coromant* [15]:

$$V(T) = V_a\, k_r(T),$$

где V_a — табличное значение скорости резания, $k_r(T)$ — коэффициент коррекции, принимаемые по рекомендациям фирмы.

Экспертная система управления состоянием. Решение проблемы построения и функционирования ЭС управления состоянием элементов и узлов станка представлено в работе [10]. Для принятия решений по управлению состоянием инструмента в процессе обработки предлагается ЭС инструментального обеспечения, построенная на базе нейронечеткого контроллера (ННК). Структурная схема такой ЭС содержит основные блоки, представленные в [14].

Множество значений параметров управления формируется ЭС на базе перечисленных ниже прогнозируемых решений по управлению функциями использования или замены инструмента.

1. Продолжать обработку *i*-м инструментом без изменения программы УЧПУ.

2. Изменить режимы обработки с помощью узла адаптации и специальных режимов резания при переходе к работе в пограничных полосах *WFBS* и *WFB* [9].

3. Оперативно сменить инструмент во избежание поломки и брака обрабатываемой детали.

Структурная обобщенная схема управления состоянием системы МС представлена на рис. 1.

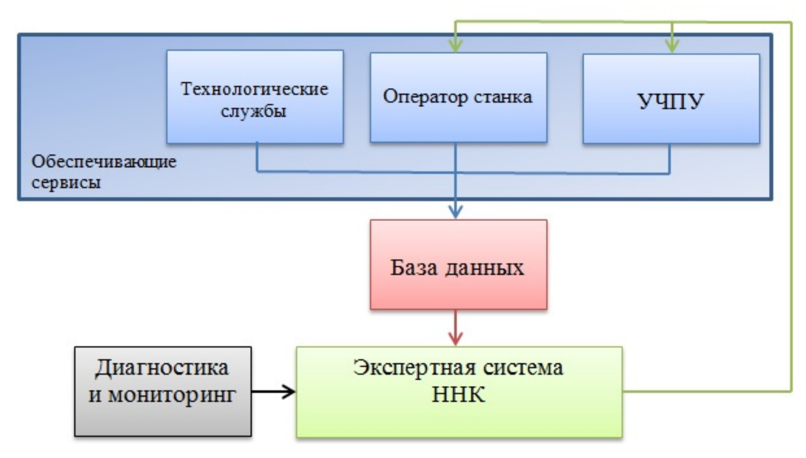


Рис. 1. Структура системы управления состоянием инструмента

Fig. 1. Structure of the tool status control system

Итак, схема демонстрирует управление состоянием инструмента при *p*-*м* проходе обработки поверхности заготовки. При этом из устройства числового программного управления (УЧПУ) в базу данных (БД) поступают сведения об *i*-м инструменте, используемом на данном проходе, о технологических режимах и пр.

В БД могут также потребоваться сведения о возможных изменениях режимов обработки, начальном состоянии геометрических параметров инструмента или иные данные от службы технолога и оператора, обслуживающих МС.

Из БД сведения поступают в экспертную систему, в базе знаний (БЗ) которой с учетом имеющихся данных определяются отклонения параметров режущей части инструмента, интенсивность его изнашивания, время обработки поверхности, временные параметры нечеткой пограничной полосы *FBS* и т. д. ЭС выводит решение о целесообразности проведения онлайн-контроля состояния инструмента. При этом запускаются устройства диагностики для оценки состояния в процессе обработки. Создание базы знаний экспертной системы требует формализации нечетких знаний предметной области [16]. Данные, поступающие от ЭС и системы диагностики, используются нейронечетким контроллером при принятии решений по управлению состоянием инструмента на основе учета его прогнозируемой стойкости. ННК реализован на базе модели типа Сугэно в программном пакете *MatLab* с расширением *Fuzzy Logic Toolbox*.

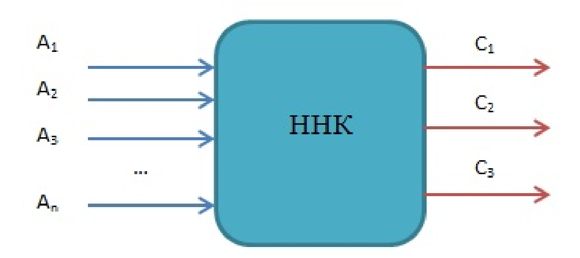


Рис. 2. Схема нейронечеткого контроллера

Fig. 2. Scheme of fuzzy neuron controller

Правила принятия решений формируются в соответствии со спецификой решаемой задачи при использовании соответствующего набора антецедентов и консеквентов. В состав антецедентов A_1–A_n при управлении состоянием *i*-го инструмента (см. рис. 2) включаются, например:

— относительная продолжительность работы инструмента *i*;

— интенсивность изнашивания;

— онлайн-оценка состояния инструмента *i*;

— состояние инструмента относительно нечеткой пограничной полосы;

— запас времени стойкости относительно продолжительности технологического перехода *p* (при программных режимах резания).

Состав консеквентов:

C_1 — продолжение процесса обработки без изменения режимов,

C_2 — продолжение обработки с коррекцией режимов резания,

C_3 — смена инструмента.

Алгоритм работы экспертной системы управления состоянием инструмента представлен на рис. 3.

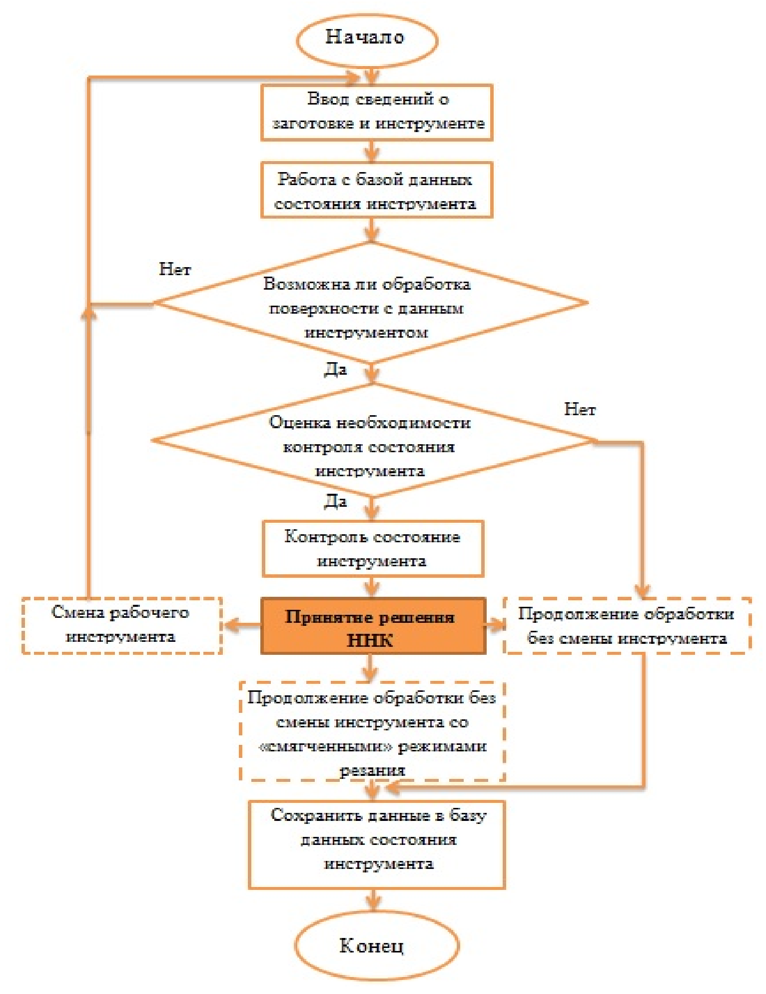


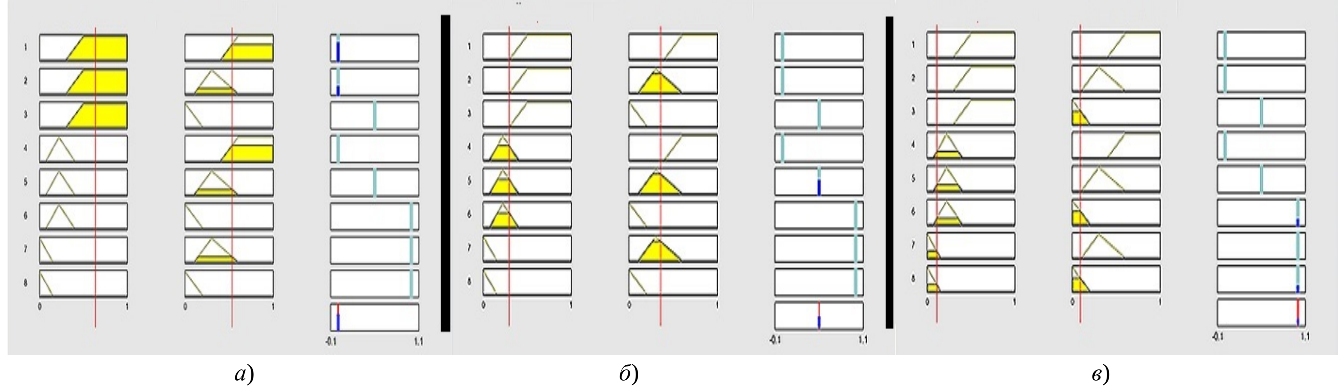
Рис. 3. Алгоритм работы ЭС управления состоянием инструмента

Fig. 3. Algorithm of expert control system operation of tool status

После ввода индекса детали (и поверхности обработки) и индекса инструмента, предназначенного для обработки поверхности, формируется система знаний «состояние инструмента». В данную систему включаются оценки интенсивности изнашивания инструмента; параметры нечеткой пограничной полосы; время, требуемое для обработки поверхности, и пр.

Далее ННК принимается решение и передаются команды, исполняемые посредством УЧПУ (в частности, корректировка кадров программы обработки и выполнение обработки до конца перехода). Возможны действия, связанные с контролем состояния обработанной поверхности, контролем состояния инструмента, а также протоколирование работы станочной системы с учетом накопленного опыта.

Пример иллюстрации фрагментов нейронечеткой модели принятия решений по состоянию инструмента в пакете *MatLab* приведен на рис. 4.



а) *б*) *в*)

Рис. 4. Иллюстрация нейронечеткой модели управления

Fig. 4. Illustration of fuzzy neuron control model

В качестве входных переменных антецедентов приняты состояние инструмента относительно пограничной полосы и запас стойкости по отношению к времени окончания обработки поверхности выполняемого технологического перехода (с термами большой, средний и малый). Как показано в алгоритме (см. рис. 2), решениями ННК являются: продолжение процесса обработки без изменений режимов, продолжение обработки с коррекцией режимов резания и смена инструмента.

Графическое представление правил принятия решений демонстрирует прогнозы по трем характерным ситуациям (см. рис. 4):

а) при состоянии стойкости инструмента до пределов нечеткой пограничной полосы (≈0,6) и относительно большом запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,5) ННК принимается решение о продолжении обработки i-м инструментом без изменения режимов резания (решение $C_1 = 0$);

б) при состоянии стойкости инструмента до пределов нечеткой пограничной полосы (≈0,3) и среднем запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,36) ННК принимается решение о продолжении обработки i-м инструментом с изменением режимов резания (решение $C_2 = 0{,}5$);

в) при состоянии стойкости инструмента в пределах нечеткой пограничной полосы (≈0,1) и относительно малом запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,09) ННК принимается решение о смене инструмента (решение $C_3 = 1$).

Испытания на современных многооперационных станках подтвердили эффективность предложенной системы управления состоянием инструмента.

Заключение. Эффективное современное компьютеризированное машиностроительное производство требует создания единой среды эксплуатации, программирования и технического обслуживания многооперационных станков. Для научного решения данной задачи предложен подход к техническому обслуживанию, предусматривающий применение бортовой интеллектуальной системы управления *e-Mind Machine* для безотказного функционирования станка при максимально эффективной обработке деталей. Немаловажным фактором является также возможность самообслуживания станка, когда часть элементов обслуживания используется станком в автоматическом режиме.

Основное внимание уделено системе управления состоянием инструментов, которое определяется такими характеристиками, как изнашиваемость, остаточная стойкость и пр. Следует отметить, что речь идет об инструментах, находящихся на станке в процессе обработки детали, и получаемые при мониторинге знания об их параметрах характеризуются как нечеткие. Вследствие этого рассматривается нечеткое интеллектуальное управление состоянием инструментального обеспечения МС.

Задача управления состоянием представлена с точки зрения теории нечетких множеств и решается на базе отображения множеств наследуемых и оперативных параметров. Показано как система мониторинга состояния МС и

инструментального обеспечения формирует нечеткие множества оперативных параметров, в том числе заключения о нечетких пограничных полосах стойкости.

Для управления состоянием предложена структура связей ЭС с устройством ЧПУ станка, технологической службой и оператором, обслуживающим станок [17]. Эти связи используются для пополнения или формирования базы данных. Полученные таким образом сведения позволяют:

— оценивать отклонения параметров режущей части инструмента, интенсивности его изнашивания, времени обработки поверхности;

— прогнозировать такие отклонения перед выполнением каждого прохода технологической операции.

Процесс принятия решений по управлению представлен в виде алгоритма работы ЭС с использованием нейронечеткого контроллера. В качестве иллюстрации приведены графические представления правил принятия решений, демонстрирующие характерные ситуации по управлению состоянием инструмента.

Библиографический список

1. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining [Электронный ресурс] / Intelligent Manufacturing Systems. — Режим доступа: http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining/ (дата обращения: 03.12.14.).

2. Čuš, F. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling / F. Čuš, U. Župerl // Journal of Mechanical Engineering. — 2011. — Vol. 2 (57). — P. 142–150.

3. Григорьев, С. Н. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, Н. Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «Станкин». — 2011. — № 3 (15). — С. 44–48.

4. Vallejo, A.-J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence / A.-J. Vallejo // Robotics, Automation and Control / ed. P. Pecherková, M. Flídr, J. Duník. — Vienna : I-Tech, 2008. — P. 494.

5. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling / E. Bagci // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6 (2). — P. 256–277.

6. Salgado, D.-R. Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis / D.-R. Salgado, F.-J. Alonso // Journal of Materials Processing Technology. — 2006. — Vol. 171 (3). — P. 451–458.

7. Jemielniak, K. Tool wear monitoring based on a non-monotonic signal feature / K. Jemielniak // Journal of Engineering Manufacture. — 2006. — Vol. 220 (2). — P. 163–170.

8. Принципы построения интеллектуальной электронной документации станка / Г. В. Самодуров [и др.] ; АПСП «Станкоинструмент» // СТИН. — 2012. — № 7. — С. 15–20.

9. Мониторинг и управление состоянием инструмента на многооперационных станках / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2016. — № 11. — С. 13–21.

10. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 51–58.

11. Zadeh, L.-A. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts / L.-A. Zadeh // International Journal of Man-Machine Studies. — 1976. — Vol. 8. — P. 249–291.

12. Zadeh, L.-A. Fuzzy sets / L.-A. Zadeh // Information and control. — 1965. — Vol. 8 (3). — P. 338–353.

13. Ni, J. Watchdog — information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use / J. Ni, J. Lee, D. Djurdjanovic // Advanced Engineering Informatics. — 2003. — Vol. 17. — P. 109–125.

14. Тугенгольд, А. К. К вопросу построения нечеткой экспертной системы продукционного типа для технологической регулировки машин / А. К. Тугенгольд, В. П. Димитров, Л. В. Борисова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — Т. 8, № 3 (38). — С. 419–426.

15. Sandvik Coromant. Техническая информация [Электронный ресурс] / Sandvik Coromant. — Режим доступа: http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/pages/default.aspx (дата обращения: 12.02.17).

16. Димитров, В. П. Формализация нечетких экспертных знаний при лингвистическом описании технических систем / В. П. Димитров, Л. В. Борисова. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2011. — 209 с.

17. Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2 (81). — С. 33–41.

References

1. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining Intelligent Manufacturing Systems. Available at: http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining. (accessed: 03.12.14.).

2. Čuš, F., Župerl, U. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling. Journal of Mechanical Engineering, 2011,vol. 2 (57), pp. 142–150.

3. Grigoryev, S.N., Gurin, V.D., Cherkasova, N.Y. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya s pomoshch'yu diagnostirovaniya sostoyaniya instrumenta s uchetom dostovernosti otobrazheniya sostoyaniya ob"ekta po kriteriyu ego otkaza. [Improving milling efficiency by tool diagnostics with account for the display validity of the object status by its failure criterion.] Vestnik MSTU "STANKIN", 2011, no. 3 (15), pp. 44–48 (in Russian).
4. Vallejo, A.-J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence. Robotics, Automation and Control. P. Pecherková, M. Flídr, J. Duník, eds. Vienna: I-Tech, 2008, p. 494.
5. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling. Scientific Research and Essays, 2011, vol. 6 (2), pp. 256–277.
6. Salgado, D.-R., Alonso, F.-J. Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis. Journal of Materials Processing Technology, 2006, vol. 171 (3), pp. 451–458.
7. Jemielniak, K. Tool wear monitoring based on a non-monotonic signal feature. Journal of Engineering Manufacture, 2006, vol. 220 (2), pp. 163–170.
8. Samodurov, G.V., et al. Printsipy postroeniya intellektual'noy elektronnoy dokumentatsii stanka. [Principles of constructing intelligent electronic machine documentation.] STIN, 2012, no. 7, pp. 15–20 (in Russian).
9. Tugengold, A.K., et al. Monitoring i upravlenie sostoyaniem instrumenta na mnogooperatsionnykh stankakh. [Monitoring and control of the tool status on multi-operation machines.] STIN, 2016, no. 11, pp. 13–21 (in Russian).
10. Tugengold, A.K., Voloshin, R.N. Gibkiy monitoring mekhatronnykh tekhnologicheskikh mashin. [Flexible monitoring of mechatronic technological machines.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 4, pp. 51–58 (in Russian).
11. Zadeh, L.-A. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. International Journal of Man-Machine Studies, 1976, vol. 8, pp. 249–291.
12. Zadeh, L.-A. Fuzzy sets. Information and control, 1965, vol. 8 (3), pp. 338–353.
13. Ni, J., Djurdjanovic, D. Watchdog — information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use. Advanced Engineering Informatics, 2003, vol. 17, pp. 109–125.
14. Tugengold, A.K., Dimitrov, V.P., Borisova, L.V. K voprosu postroeniya nechetkoy ekspertnoy sistemy produktsionnogo tipa dlya tekhnologicheskoy regulirovki mashin. [To the question of fuzzy expert system constructing production type for technological adjustment of machines.] Vestnik of DSTU, 2008, vol. 8, no. 3 (38), pp. 419–426 (in Russian).
15. Sandvik Coromant. Technology Information. Available at: http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/pages/default.aspx (accessed: 12.02.17).
16. Dimitrov, V.P., Borisova, L.V. Formalizatsiya nechetkikh ekspertnykh znaniy pri lingvisticheskom opisanii tekhnicheskikh system. [Formalization of fuzzy expert knowledge at the linguistic description of technical systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2011, 209 p. (in Russian).
17. Tugengold, A.K., et al. Otsenka nechetkoy granitsy stoykosti instrumenta mnogooperatsionnogo stanka. [The estimation of fuzzy boundary of multioperational machine tool life.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, № 2 (81), pp. 33–41 (in Russian).

Поступила в редакцию 26.03.2016
Сдана в редакцию 31.03.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 26.03.2016
Submitted 31.03.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016

Об авторах:

Тугенгольд Андрей Кириллович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
akt0@yandex.ru

Authors:

Tugengold, Andrey K.,
professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
akt0@yandex.ru

Изюмов Андрей Игоревич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9054-448X
Andrei-igorevich1991@yandex.ru

Волошин Роман Николаевич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907 B
r.voloshin2909@gmail.com

Соломыкин Михаил Юрьевич,
магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru

Izyumov, Andrey I. ,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9054-448X
Andrei-igorevich1991@yandex.ru

Voloshin, Roman N.,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907 B
r.voloshin2909@gmail.com

Solomykin, Mikhail Y.,
undergraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru